

钼硒配施对小白菜钼硒形态及硒价态的影响^①

张 木^{1,2}, 胡承孝^{1*}, 孙学成¹, 谭启玲¹, 赵小虎¹, 张晓栋¹

(1 华中农业大学微量元素研究中心, 武汉 430070; 2 广东省农业科学院农业资源与环境研究所, 广州 510640)

摘 要: 通过盆栽试验研究钼硒配施对水培小白菜钼硒形态及硒价态的影响。结果表明: 施硒增加了小白菜地上部及地下部醇溶态和水溶态钼含量, 降低了小白菜地上部及地下部盐溶态及醋酸溶态钼的含量, 增加了地下部盐酸溶态钼含量, 对地上部盐酸溶态钼含量没有太大的影响。施钼对小白菜地上部醇溶态、水溶态硒含量影响不大, 增加了盐溶态及盐酸溶态硒的含量, 降低了醋酸溶态硒的含量; 施钼对小白菜地下部醇溶态硒含量影响不大, 降低了水溶态硒的含量, 增加了盐溶态、醋酸溶态及盐酸溶态硒的含量。施用四价的亚硒酸钠对小白菜可食部位硒的有机化较为有利, 并且施钼也能促进高硒水平下小白菜体内硒的有机化。因此, 钼硒配施虽然对小白菜体内钼和硒的各赋存形态有拮抗作用也有协同作用, 但是有利于生产富含有机硒的作物。

关键词: 钼; 硒; 四价; 六价; 小白菜

中图分类号: S143.79

植物体内矿质元素的赋存形态对植物正常的生长代谢有重要作用, 钼是植物体所必需的营养元素, 植物体内不同化学形态的钼各自有着不同的作用, 对植物体内钼的化学形态进行分析可以从更深层次来揭示钼对植物代谢的作用。硒尚未证明是植物所必需的营养元素, 但硒与钼有着共同的吸收路径, 硒对植物钼的吸收有着显著的影响且关系复杂^[1-2]。硒主要是通过硫的途径参与到植物体的代谢中去, 它在植物体内的形态赋存情况直接关系着植物的正常生长代谢^[3-4]。硒进入植物体后同化为硒蛋氨酸和硒半胱氨酸, 在此过程中硒累积型植物与硒非累积型植物就会有着明显的不同之处, 对于硒非累积型植物来说, 硒氨基酸就会结合进蛋白质充当了酶蛋白, 进而影响了该蛋白的正常功能, 可能会对植物造成毒害或者是潜在毒害; 对于累积型植物来说, 硒氨基酸会被同化为硒-甲基半胱氨酸等非蛋白氨基酸, 这是一种生理钝化机制, 也是累积型植物耐高硒的机理之一^[5]。通过对植物体内的钼硒化学形态进行分析, 从而来探索钼对植物硒的代谢是否有着积极意义又或是消极意义。中国大面积的土壤不但缺钼而且还伴随着硒元素的缺乏^[6-8], 钼与硒均为人体所必需的营养元素^[9-10], 一般情况下人体所得的钼与硒均为食物所补充, 并且人体对这些元素的吸收多以有机结合态的物质来吸

收, 研究钼硒配施是否有促进相互之间有机化的作用, 也具有重要的人体营养学意义。

结合在植物体各类物质中的钼与硒, 由于其结构及性质的差异, 导致钼与硒的不同形态物质在不同种类溶剂中的溶解度不同, 因此植物体内的钼与硒所赋存的化学形态按提取方法分类可分为醇溶态、水溶态、盐溶态、醋酸溶态、盐酸溶态以及残渣态。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

供试小白菜品种为“五月蔓”, 采用水培方式进行试验。小白菜种子先用 0.5% 的 NaClO₄ 进行消毒, 然后进行催芽处理, 7 天后选择大小一致的小白菜幼苗移至装有 3 L 营养液的黑色不透光塑料盒内, 每盆定苗 8 株。每 4 天更换营养液一次, 首次采用 1/4 营养液培养, 第二次采用 1/2 营养液培养, 而后采用全量营养液培养直至收获。大量元素采用 492 mg/L 的 Ca(NO₃)₂·4H₂O, 1 020 mg/L KNO₃, 230 mg/L NH₄H₂PO₄ 和 490 mg/L MgSO₄·7H₂O, 而微量元素采用 20 mg/L EDTA-Fe, 2.86 mg/L H₃BO₃, 1.54 mg/L MnCl₂·4H₂O, 0.22 mg/L ZnSO₄·7H₂O 和 0.08 mg/L CuSO₄·5H₂O。试验设 3 个钼水平(0.01, 0.1, 1 mg/L)和 4 个硒水平(0, 0.01, 0.1, 1 mg/L), 采用完全交互试验设计, 共 12

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金项目(2010PY025、2011PY150)和研究生科技创新专项项目(2011ZC024)资助。

* 通讯作者(hucx@mail.hzau.edu.cn)

作者简介: 张木(1984—), 男, 河南潢川人, 博士, 助理研究员, 主要从事植物微量元素营养机理研究。E-mail: zhangmu1123@126.com

个处理 ($\text{Mo}_{0.01}\text{Se}_0$, $\text{Mo}_{0.01}\text{Se}_{0.01}$, $\text{Mo}_{0.01}\text{Se}_{0.1}$, $\text{Mo}_{0.01}\text{Se}_1$, $\text{Mo}_{0.1}\text{Se}_0$, $\text{Mo}_{0.1}\text{Se}_{0.01}$, $\text{Mo}_{0.1}\text{Se}_{0.1}$, $\text{Mo}_{0.1}\text{Se}_1$, Mo_1Se_0 , $\text{Mo}_1\text{Se}_{0.01}$, $\text{Mo}_1\text{Se}_{0.1}$, Mo_1Se_1), 每个处理重复 4 次。钼和硒的肥源分别为分析纯的 $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 和 Na_2SeO_3 , 试验用水为超纯水。移栽 39 天后收获, 样品分为根、叶柄和叶片, 分别记录鲜重, 样品洗净后于 65°C 烘至恒重, 记录干重, 而后磨细过筛。

1.2 测试项目与分析方法

植物钼和硒形态的测定: 各化学形态钼、硒的测定采用连续浸提的方法来提取^[11-12], 称约 0.5 g 植物样品于 100 ml 离心管中, 加入 80% 的乙醇溶液进行提取(样品与提取液的提取比为 1:100), 浸泡 24 h, 在 25°C 下恒温震荡 1 h, 而后于 5 000 r/min 离心 10 min, 小心倒出上清液于三角瓶中, 再次加入 80% 的乙醇提取液进行二次浸提, 合并两次上清液, 即得到醇溶态钼和醇溶态硒, 按上述步骤分别采用去离子水、1 mol/L NaCl、2% 的醋酸、0.6 mol/L HCl 进行提取, 共得到醇溶态(单糖、二糖以及可溶于乙醇的小分子有机物)、水溶态(水溶性蛋白、水溶态多糖、可溶于水的无机态物质)、盐溶态(盐溶性蛋白、可与盐交换态物质)、醋酸溶态(磷酸盐类化合物)、盐酸溶态(草酸盐类化合物)及剩余残渣态的钼与硒。上述每步所得到的上清液先加入 5 ml 硝酸在低温电热板上(不高于 200°C)小心蒸至溶液剩余约 2 ~ 3 ml 时取下, 而后加入 10 ml 4:1 的硝酸高氯酸的混合液, 再次于低温电热板上消化至 2 ~ 3 ml 溶液清亮时取下, 而后加入 10 ml 1:1 的盐酸溶液, 加热至溶液清亮, 而后转移至 50 ml 容量瓶定容。溶液中的

钼采用催化极谱法测定^[13], 硒则采用原子荧光氢化物发生法测定^[14-15]。

小白菜无机硒、有机硒及 4 价和 6 价硒含量的测定: 称取约 0.5 g 植物样品, 加入 10 ml 去离子水, 沸水浴提取 30 min, 然后每超声 4 s 间隔 4 s, 共超声 60 次, 而后采用上述方法重新提取, 合并提取液, 用于无机硒的测定。植物体内全量硒测定后扣除按上述方法测定的无机硒含量, 所得结果即为植物体内有机硒的含量。取上述测定无机硒的提取液进行 4 价与 6 价硒含量的测定, 取两份提取液在硝化及上机时不加 6 mol/L 盐酸进行还原测出的结果为 4 价硒, 而加入 6 mol/L 盐酸进行还原测出的结果为 4 价硒和 6 价硒之和, 由此分别得到 4 价硒与 6 价硒含量^[16]。

1.3 数据处理

使用 Excel 2003 进行数据处理, 采用 SPSS 12.0 进行方差分析, 各因素主效应及交互效应分析采用 F -test 法, 处理平均值之间的多重比较采用 Duncan-test ($P < 0.05$) 法。使用 Sigmaplot 10.0 进行绘图。 $F(\text{Mo})$ 表示方差分析中施钼的主效应、 $F(\text{Se})$ 表示施硒的主效应、 $F(\text{Mo} \times \text{Se})$ 表示钼硒的交互效应。

2 结果与分析

2.1 钼硒配施对小白菜地上部和地下部钼和硒总含量的影响

表 1 反映的是小白菜地上部及地下部钼和硒的含量, 施硒有降低 0.01 mg/L 和 0.1 mg/L 两个钼水平小白菜地上部和地下部钼含量的趋势, 而施硒显

表 1 钼硒配施对小白菜地上部及根钼和硒含量的影响
Table 1 Interactive effects of Mo and Se on Mo and Se contents in shoots and roots of Chinese cabbage

处理	钼含量(mg/kg)		硒含量(mg/kg)	
	地上部	根	地上部	根
$\text{Mo}_{0.01}\text{Se}_0$	$4.73 \pm 0.25 \text{ d}$	$10.13 \pm 0.89 \text{ cd}$	$0.03 \pm 0.01 \text{ e}$	$0.17 \pm 0.02 \text{ e}$
$\text{Mo}_{0.01}\text{Se}_{0.01}$	$4.60 \pm 0.28 \text{ d}$	$10.26 \pm 1.11 \text{ cd}$	$0.51 \pm 0.02 \text{ c}$	$4.51 \pm 0.11 \text{ c}$
$\text{Mo}_{0.01}\text{Se}_{0.1}$	$4.22 \pm 0.32 \text{ d}$	$6.68 \pm 0.27 \text{ d}$	$3.48 \pm 0.09 \text{ b}$	$9.33 \pm 0.15 \text{ a}$
$\text{Mo}_{0.01}\text{Se}_1$	$3.63 \pm 0.24 \text{ d}$	$5.78 \pm 0.49 \text{ d}$	$9.35 \pm 0.07 \text{ a}$	$9.42 \pm 0.03 \text{ a}$
$\text{Mo}_{0.1}\text{Se}_0$	$12.54 \pm 0.37 \text{ c}$	$19.85 \pm 0.35 \text{ c}$	$0.03 \pm 0.01 \text{ e}$	$0.16 \pm 0.02 \text{ e}$
$\text{Mo}_{0.1}\text{Se}_{0.01}$	$12.07 \pm 0.27 \text{ c}$	$19.39 \pm 0.61 \text{ c}$	$0.42 \pm 0.03 \text{ cd}$	$3.75 \pm 0.19 \text{ d}$
$\text{Mo}_{0.1}\text{Se}_{0.1}$	$11.09 \pm 0.59 \text{ c}$	$15.50 \pm 0.42 \text{ cd}$	$3.28 \pm 0.15 \text{ b}$	$9.44 \pm 0.09 \text{ a}$
$\text{Mo}_{0.1}\text{Se}_1$	$9.85 \pm 0.46 \text{ c}$	$14.07 \pm 0.39 \text{ cd}$	$9.18 \pm 0.05 \text{ a}$	$9.47 \pm 0.05 \text{ a}$
Mo_1Se_0	$76.78 \pm 2.19 \text{ a}$	$77.74 \pm 6.51 \text{ b}$	$0.02 \pm 0.00 \text{ e}$	$0.15 \pm 0.02 \text{ e}$
$\text{Mo}_1\text{Se}_{0.01}$	$75.62 \pm 0.94 \text{ a}$	$87.15 \pm 3.37 \text{ ab}$	$0.30 \pm 0.01 \text{ d}$	$3.67 \pm 0.08 \text{ d}$
$\text{Mo}_1\text{Se}_{0.1}$	$69.52 \pm 1.09 \text{ b}$	$91.17 \pm 2.18 \text{ a}$	$3.38 \pm 0.12 \text{ b}$	$8.88 \pm 0.18 \text{ b}$
Mo_1Se_1	$70.38 \pm 1.70 \text{ b}$	$91.94 \pm 3.83 \text{ a}$	$9.31 \pm 0.02 \text{ a}$	$9.41 \pm 0.04 \text{ a}$
$F(\text{Mo})$	6 361.22**	1 169.46**	3.16	10.61**
$F(\text{Se})$	9.87**	0.74	11 973.04**	5 767.44**
$F(\text{Mo} \times \text{Se})$	3.42**	4.03**	1.07	6.24**

注: 表中同列数据小写字母不同表示处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平, * 和 ** 分别表示 F 值检验显著性达到 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平。

著地增加了 1 mg/L 钼水平小白菜根钼的含量,降低了 1 mg/L 钼水平小白菜地下部钼的含量,可能是硒能抑制高钼水平下钼过多地向地上部转移。施钼对不施硒处理小白菜地上部及地下部硒含量没有显著影响,但是施钼显著地降低了 0.01 mg/L 硒水平小白菜地上部及地下部硒的含量;施钼对 0.1 mg/L 及 1 mg/L 两个硒水平小白菜地上部及地下部硒含量没有显著影响,而且 0.1 mg/L 和 1 mg/L 两个硒水平小白菜根硒含量基本相当,可能是当外界的硒含量高于 0.1 mg/L 时小白菜根硒达到一个相对饱和的状态,而此时小白菜对硒的吸收能力则取决于硒向地上部的转移能力,但是施钼对 0.1 mg/L 和 1 mg/L

两个硒水平地上部硒含量均没有显著影响,说明了施钼对该饱和状态下硒向地上部的转移并没有显著影响。

2.2 钼硒配施对地上部和地下部各形态钼所占总量比例的影响

图 1 所示的是小白菜地上部醇溶态、水溶态、盐溶态、醋酸溶态、盐酸溶态及残渣态钼各自所占总量的百分比,从这个图可以看出施硒能增加醇溶态钼和水溶态钼所占比例,降低残渣态钼所占比例,对盐溶态、醋酸溶态及盐酸溶态钼所占比例影响不大;施钼对地上部各形态钼占总量的比例影响不大。如图2所示,施硒增加了地上部醇溶态、水溶态钼所占总量的

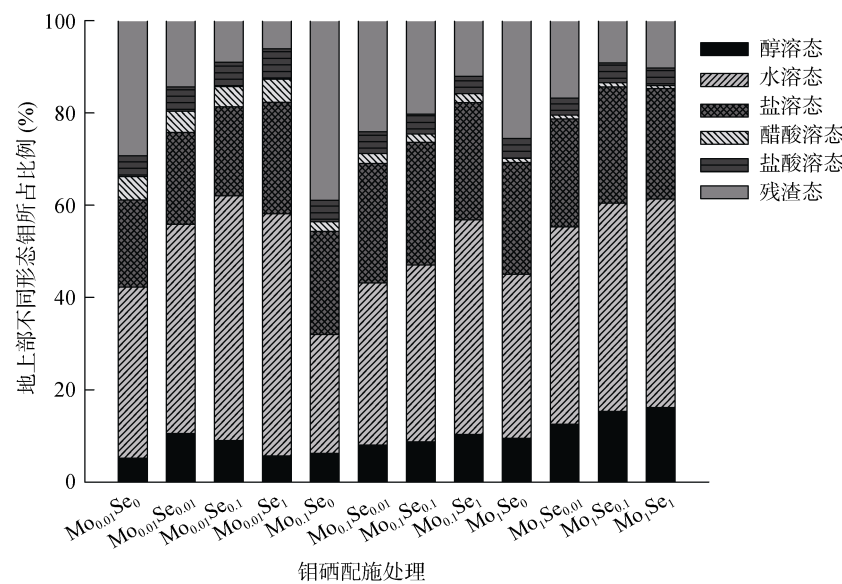


图 1 钼硒配施对地上部不同形态钼所占比例的影响

Fig. 1 Interactive effects of Mo and Se on proportion of different forms of Mo in shoots of Chinese cabbage

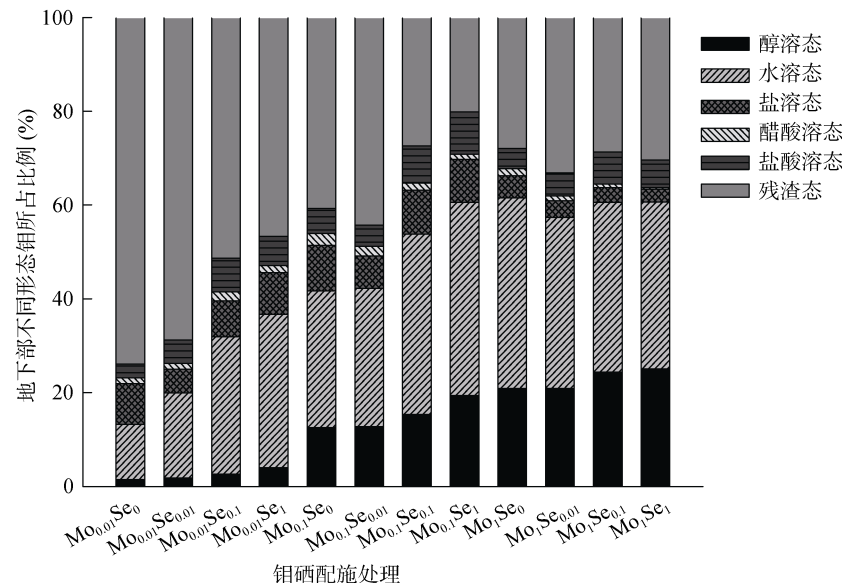


图 2 钼硒配施对地下部不同形态钼所占比例的影响

Fig. 2 Interactive effects of Mo and Se on proportion of different forms of Mo in roots of Chinese cabbage

比例,降低了残渣态钼所占比例,施钼显著地增加了醇溶态、水溶态钼所占总量的比例,降低残渣态钼所占总量的比例。

2.3 钼硒配施对地上部和地下部各形态硒所占总量比例的影响

如图 3 所示,施钼时小白菜体地上部醇溶态硒、水溶态硒、盐溶态硒含量所占的比例较高,不施钼时

小白菜体内醋酸溶态硒所占的比例较高,而且残渣态硒的含量随着施硒量的增加而降低;施钼对地上部不同硒水平上各形态硒所占比例的影响不同,影响程度也不大。由图 4 可知,不施钼时小白菜根中醇溶态及残渣态硒所占比例较高,施钼时醇溶态、水溶态及残渣态硒含量所占比例较高,施钼对根中不同形态硒所占比例影响不大。

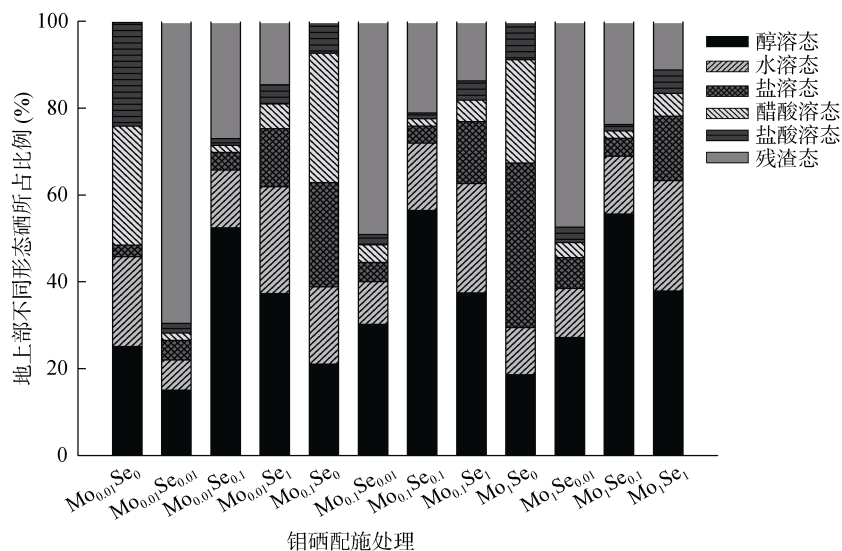


图 3 钼硒配施对地上部不同形态硒所占比例的影响

Fig. 3 Interactive effects of Mo and Se on proportion of different forms of Se in shoots of Chinese cabbage

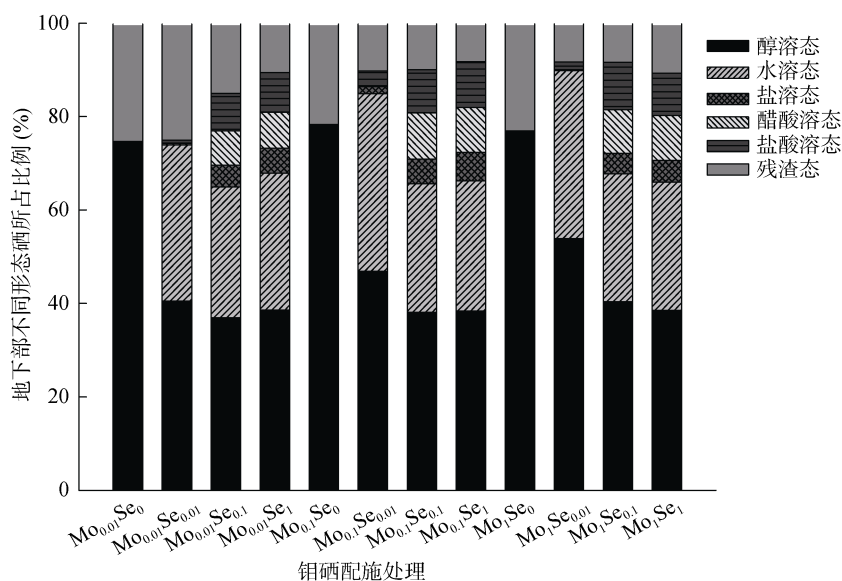


图 4 钼硒配施对地下部不同形态硒所占比例的影响

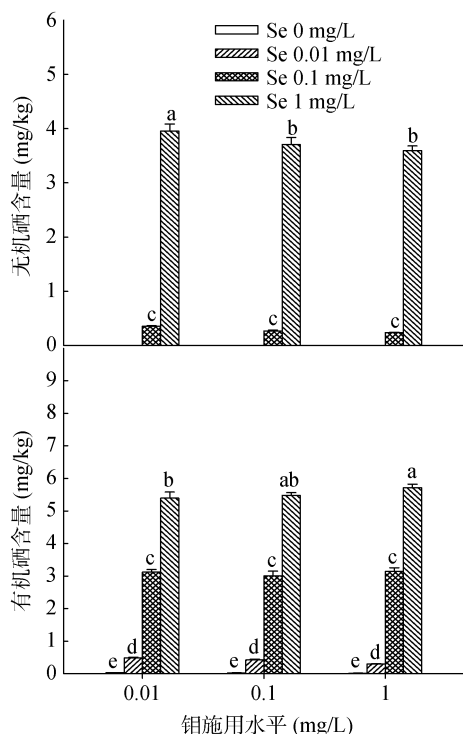
Fig. 4 Interactive effects of Mo and Se on proportion of different forms of Se in roots of Chinese cabbage

2.4 钼硒配施对小白菜有机硒和无机硒含量的影响

如图 5 所示,施钼对小白菜可食部位无机硒的含量有显著影响($P<0.05$),而施钼对小白菜可食部位有机硒的含量没有显著影响;施钼对小白菜可食部位无机硒和有机硒含量均有着显著影响($P<0.05$);钼硒互

作对可食部位无机硒含量及有机硒含量均没有表现出显著影响。施钼显著($P<0.05$)提高了小白菜无机硒的含量,而在低硒水平时小白菜体内的无机硒含量较低,在 0 mg/L 与 0.01 mg/L 两个硒水平,小白菜体内无机硒含量近乎检测不出;施钼显著($P<0.05$)降低了

1 mg/L 硒水平小白菜无机硒的含量。施硒显著($P < 0.05$)提高了小白菜可食部位有机硒的含量,在较低硒水平时小白菜体内的有机硒含量远高于无机硒的含量;施钼也增加了 1 mg/L 硒水平小白菜有机硒的含量。结果表明,植物体内的硒大多以有机硒的形态存在,施硒不但提高了小白菜有机硒的含量,而且也提高了无机硒的含量,在供应较低浓度的硒时,硒在小白菜体内大多以有机硒存在;钼对高硒水平小白菜有机硒有促进作用,对无机硒含量则呈降低作用。



(F -test: 无机硒含量: $F(\text{Mo}) = 4.35^*$, $F(\text{Se}) = 2\,942.43^{**}$, $F(\text{MoxSe}) = 2.17$; 有机硒含量: $F(\text{Mo}) = 0.45$, $F(\text{Se}) = 2\,514.35^{**}$, $F(\text{MoxSe}) = 1.66$; 图中小写字母不同表示处理间差异达到 $P < 0.05$, 显著水平, 下同)

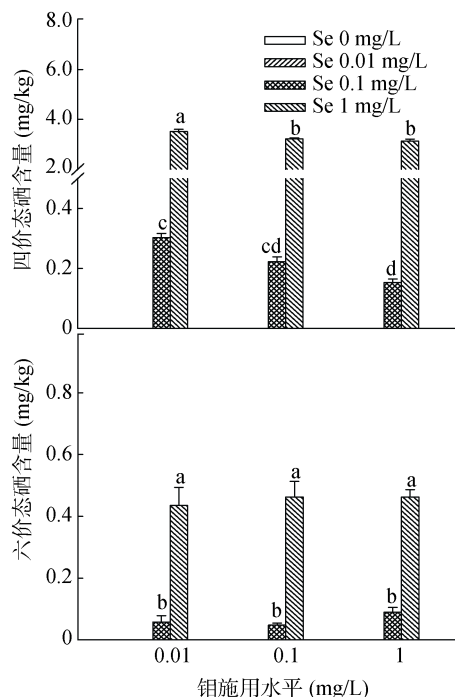
图 5 钼硒配施对小白菜可食部位有机硒及无机硒含量的影响

Fig. 5 Interactive effects of Mo and Se on organic and inorganic Se contents in edible parts of Chinese cabbage

2.5 钼硒配施对小白菜四价及六价硒含量的影响

如图 6 所示,植物体内的无机硒又可分为四价硒和六价硒,本试验中供应的为四价硒源,因此小白菜体内的四价硒含量较高,六价硒含量较低。施钼对小白菜体内四价硒含量有显著影响($P < 0.05$),对六价硒含量则没有显著影响;施硒对四价硒及六价硒均有显著影响($P < 0.05$);钼硒互作对四价硒和六价硒含量均没有表现出显著的交互效应。施硒显著($P < 0.05$)提高了小白菜体内四价硒的含量,施钼降低了四价硒的含量。施硒显著($P < 0.05$)提高了小白菜体内六价硒的含量,施钼对六价硒的含量并没有表现出促进或抑制效

应。结果表明,植物体内硒的价态主要由所提供硒源的价态所决定,本试验中小白菜的四价硒含量远高于六价硒含量,而且施钼对四价硒含量呈现出拮抗效应,但对六价硒含量影响不大。



(F -test: 四价硒含量: $F(\text{Mo}) = 9.17^{**}$, $F(\text{Se}) = 4\,507^{**}$, $F(\text{MoxSe}) = 2.17$; 六价硒含量: $F(\text{Mo}) = 0.4$, $F(\text{Se}) = 236.52^{**}$, $F(\text{MoxSe}) = 0.28$)

图 6 钼硒配施对小白菜地上部四价及六价硒含量的影响

Fig. 6 Interactive effects of Mo and Se on tetraivalent and hexavalent Se contents in shoots of Chinese cabbage

3 讨论

3.1 钼硒配施对小白菜体内钼硒各赋存形态的影响有拮抗效应也有协同效应

虽然从小白菜体内钼硒总量上来看,硒对不同钼水平上小白菜体内钼的含量影响不同,而钼对不同硒水平上小白菜体内硒含量的影响也不同,但是我们并不清楚导致这种差异的本质原因,因此对小白菜体内钼和硒的形态进行分析能更好地理解其差异的根本原因。本试验中小白菜体内的钼按提取剂的种类依次分为醇溶态、水溶态、盐溶态、醋酸溶态、盐酸溶态及残渣态。每种提取剂所提取的是能溶于该种溶剂的一类物质^[17],如醇溶态所提取的为单糖、二糖以及可溶于乙醇的小分子有机物,水溶态的则为水溶性蛋白、水溶态多糖、可溶于水的无机态物质,盐溶态的为盐溶性蛋白、可与盐交换态物质,醋酸溶态的为磷酸盐类化合物,盐酸溶态的则为草酸盐类化合物,残渣态的即为不溶于上述溶剂的物质。植物在正常代谢过程中,钼和硒在每类物质中所起的作用各有不同,

如植物缺钼会影响含钼蛋白酶的合成及活性,而且钼还影响正磷酸磷及焦磷酸脂类化合物的水解作用,同时对植物体内有机磷和无机磷的含量也有影响^[18-19]。植物吸收较低浓度的硒对植物的生长有着一定的刺激作用,吸收较高浓度的硒则会对植物产生一定的毒害作用,而硒在植物体内的生物有效性又或是毒性的化学本质不仅取决于硒在植物体内含量的高低,更是取决于它在植物体内所赋存的化学形态,硒对植物的生理活性与硒在植物体内的化学形态关系密切^[20-21]。当硒从硫的代谢途径进入植物体后,同化为硒代氨基酸,对于硒累积型植物来说,则形成非蛋白氨基酸进而产生生理钝化,而对于低累积型植物来说则结合成蛋白质,由于结合进硒的蛋白质构型发生了改变,植物不能进行正常的生长代谢则发生毒害。如果从人体营养学的角度来看,我们则是更加希望钼与硒的有机化,即尽可能地结合进蛋白质,这种结合进蛋白质的钼与硒则更易被人体吸收利用。

施用钼、硒分别可以提高植物体内各化学形态的钼和硒的含量,本研究中,钼硒配施试验更是证实了钼和硒均能影响对方在植物体内的化学形态。施硒对小白菜地上部及地下部醇溶态钼、水溶态钼均表现出了协同效应,对小白菜地上部及地下部盐溶态及醋酸溶态钼的含量则表现出了拮抗效应,对地上部盐酸溶态钼含量影响不大,但对地下部盐酸溶态钼的含量则有着促进作用。本试验中施硒对钼形态的影响也多集中于对高水平钼处理的影响,可能是施硒调节着钼在植物体内的分配,尽可能地把钼转化为起到生理钝化的形态,如增加根中盐酸溶态钼的含量就是一个生理钝化的表现。盐酸溶态的多为草酸盐类的化合物,这类物质是植物体内的惰性代谢产物^[22],增加这部分物质中钼的含量,就相对降低了对植物体的生理有效性,对缓解高钼毒害有一定的作用。

先前的研究表明植物体内醇溶态、水溶态及盐溶态的硒含量相对较高^[23],本试验的结果基本与之相符,而且随着施硒量的增加醇溶态硒所增加的幅度最大,残渣态硒的降低幅度最大。施钼对小白菜地上部醇溶态、水溶态硒的含量影响不大,提高了盐溶态及盐酸溶态硒的含量,降低了醋酸溶态硒的含量。施钼对小白菜地下部醇溶态硒含量影响不大,降低了水溶态硒的含量,增加了盐溶态、醋酸溶态及盐酸溶态硒的含量。施钼对硒形态的影响可能主要是影响到氮的代谢,进而影响到硫的代谢,影响了硒在小白菜体内的代谢过程所致。

3.2 施钼以及硒源的价态均对小白菜体内硒的有机化产生影响

植物体内的有机硒对人体的有效性较高,易被人体吸收利用,无机硒则不易被人体吸收利用,因此生产富硒的作物也主要是生产富含高有机硒的作物。研究表明,植物体内的硒大多以有机硒的形态存在,适当地提高供硒水平可以促进植物体内无机硒向有机硒的转化,但是当硒浓度过高时有机硒的转化率又会降低^[24]。硒的有机化程度还与施用的硒源有关,植物吸收的四价硒并不能大量向地上部运输,需在根中同化为有机硒或者是转化为六价硒才能向地上部转移^[25-27],因此据此特点我们可以采用施用四价硒的方式来生产富硒作物,因为施用四价硒源时地上部所赋存的硒大多都是在根中已经转化为有机态硒而向上运输,此时硒的有机化程度也相对较高,同时生产的富硒作物也相对安全。本试验也应证了这些结论,当供应低水平的硒时,植物体内的硒主要是有机硒,只有当供给较高浓度的硒时,小白菜体内才会出现无机硒的累积,施钼也促进了高硒水平小白菜体内硒的有机化。本试验检测到的六价硒含量较低,从另一个角度也说明硒主要是以有机态向上运输,通过植物在根中转化为六价硒再向上运输的量相对较少。但是值得注意的是,当供应植物硒浓度过高时,四价硒出现在地上部的含量也相对较高,暂时还难以判断这部分硒是从地下部直接向上运输的还是在地上部生成的。

3.3 结论

施硒能增加小白菜地上部及地下部醇溶态钼、水溶态钼含量,对小白菜地上部及地下部盐溶态及醋酸溶态钼的含量则表现出了拮抗效应,对地上部盐酸溶态钼含量影响不大,但对地下部盐酸溶态钼含量则有着促进作用。施钼对小白菜地上部醇溶态、水溶态硒的含量影响不大,提高了盐溶态及盐酸溶态硒的含量,降低了醋酸溶态硒的含量;施钼对小白菜地下部醇溶态硒含量影响不大,降低了水溶态硒的含量,增加了盐溶态、醋酸溶态及盐酸溶态硒的含量。施用四价硒源对小白菜可食部位硒的有机化较为有利,施钼能促进高硒水平小白菜体内硒的有机化。

参考文献:

- [1] Zhang M, Hu CX, Zhao XH, Tan QL, Sun XC, Li N. Impact of molybdenum on Chinese cabbage response to selenium in solution culture[J]. Soil Sci. Plant Nutr., 2012, 58(5): 595-603
- [2] 张木, 胡承孝, 赵小虎, 孙学成, 谭启玲. 钼硒互作对小白菜产量及营养品质的影响[J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(3): 72-76

- [3] White PJ, Bowen HC, Parmaguru P, Fritz M, Spracklen WP, Spiby RE, Meacham MC, Mead A, Harriman M, Trueman LJ, Smith BM, Thomas B, Broadley MR. Interactions between selenium and sulphur nutrition in *Arabidopsis thaliana*[J]. J. Exp. Bot., 2004, 55: 1 927–1 937
- [4] 雷红灵. 植物硒及其含硒蛋白的研究[J]. 生命科学, 2012, 24(2): 123–129
- [5] White PJ, Bowen HC, Marshall B, Broadley MR. Extraordinarily high leaf selenium to sulfur ratios define 'Se-accumulator' plants [J]. Ann. Bot., 2007, 100: 111–118
- [6] 刘铮, 朱其清, 唐丽华, 徐俊祥, 尹楚良. 我国缺乏微量元素土壤及其区域分布[J]. 土壤学报, 1982, 19(3): 209–223
- [7] 李伟, 李飞, 毕德, 王华魁, 李海勇, 周守标, 赵其国, 尹雪斌. 兰州碱性土壤与农产品中硒分布及形态研究[J]. 土壤, 2012, 44(4): 632–638
- [8] Chen JS, Wei FS, Zheng CJ, Wu YY, Adriano DC. Background concentrations of elements in soil of China[J]. Water Air Soil Poll, 1991(57–58): 699–712
- [9] 刘牧. 钼对人体健康的影响[J]. 中国钼业, 25(5): 43–45
- [10] 李永明, 孙玉新, 刘德辉. 施硒对药用菊花主要有效成分和花中硒含量的影响[J]. 土壤, 2010, 42(4): 618–623
- [11] 杨居荣, 贺建群, 张国祥, 毛显强. 农作物对 Cd 毒害的耐性机理探讨[J]. 应用生态学报, 1995, 6(1): 87–91
- [12] 刘杨, 王昌全, 李冰, 李焕秀, 杜倩, 张伟. 硒锌交互对春茶硒化学形态的影响[J]. 茶叶科学, 2010, 30(5): 343–349
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 141–147
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化委员会. 茶叶中硒含量的检测方法(21729-2008)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008
- [15] 陈秋香, 施卫明, 王校常. 有色稻与常规稻富硒能力比较及其机理初探[J]. 土壤, 2010, 42(1): 88–94
- [16] 王梅, 张红香, 邹志辉, 杨冰仪, 陈健. 原子荧光光谱法测定富硒螺旋藻片中不同形态、价态的硒[J]. 食品科学, 2011, 32(6): 179–182
- [17] 邓桂春, 侯松眉, 铁梅, 张新, 孟伟, 于桂英, 藏树良. 富硒蛹虫草试样中硒的形态分析[J]. 分析科学学报, 2006, 22(1): 21–24
- [18] Schwarz G. Molybdenum cofactor biosynthesis and deficiency[J]. Cell. Mol. Life Sci., 2005, 62: 2 792–2 810
- [19] Schwarz G, Mendel RR, Ribbe MW. Molybdenum cofactors, enzymes and pathways[J]. Nature, 2009, 460: 839–847
- [20] Beilstein MA, Whanger PD, Yang GQ. Chemical forms of selenium in corn and rice grown in a high selenium area of China[J]. Biomed. Environ. Sci., 1991, 4(4): 392–398
- [21] Kassis EE, Cathala N, Rouached H, Fourcroy P, Berthomieu P, Terry N, Davidian JC. Characterization of a selenate-resistant *Arabidopsis* mutant. Root growth as a potential target for selenate toxicity[J]. Plant Physiol., 2007, 143(3): 1 231–1 241
- [22] 张英鹏, 杨运娟, 杨力, 李彦, 高弼模, 王学君, 董晓霞. 草酸在植物体内的累积代谢及生理作用研究进展[J]. 山东农业科学, 2007(6): 61–67
- [23] 杨寒文. 恩施烤烟硒含量分析及减害作用研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2009
- [24] 陈金, 潘根兴, 王雅玲. 土壤硒水平对两种春大豆硒吸收与转化的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(2): 428–432
- [25] Arvy M. Selenate and selenite uptake and translocation in bean plants (*Phaseolus vulgaris*) [J]. J. Exp. Bot., 1993, 44: 1 083–1 087
- [26] 黄青青, 杜威, 王琪, 张敬锁, 江荣风, 李花粉. 水稻对不同土壤中硒酸盐/亚硒酸盐的吸收和富集[J]. 环境科学学报, 2013, 33(5): 1 423–1 429
- [27] Zhang Y, Pan G, Chen J, Hu Q. Uptake and transport of selenite and selenate by soybean seedlings of two genotypes[J]. Plant Soil, 2003, 253: 437–443

Effects of Co-application of Molybdenum and Selenium on Valence of Selenium and Chemical Forms of Molybdenum and Selenium of Chinese Cabbage

ZHANG Mu^{1,2}, HU Cheng-xiao^{1*}, SUN Xue-cheng¹, TAN Qi-ling¹, ZHAO Xiao-hu¹, ZHANG Xiao-dong¹

(1 Micro-element Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2 Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A solution culture experiment was conducted to determine the effects of co-application of Mo and Se on valence of Se and chemical forms of Mo and Se. The results showed that application of Se increased alcohol soluble and water soluble Mo concentrations in roots and shoots and decreased salt soluble and acetic acid Mo concentrations in roots and shoots of Chinese cabbage. Application of Se had no significant effect on shoot hydrochloric acid Mo concentration, but increased root hydrochloric acid Mo concentration. Application of Mo had no significant effects on shoot alcohol soluble and water soluble Se concentrations, but increased salt soluble and hydrochloric acid Se concentrations and decreased acetate acid Se concentration. Application of Mo had no significant effect on root alcohol soluble Se concentration, but decreased water soluble Se concentration and increased salt soluble, acetate acid and hydrochloric acid Se concentrations. Application of tetravalent Se was conducive to the conversion of inorganic Se to organic Se and application of Mo can promote inorganic Se transform to organic Se in high Se level. Therefore, co-application of Mo and Se had antagonism and synergies on Mo and Se chemical forms, but conducive to the production of organic Se-rich crops.

Key words: Molybdenum, Selenium, Tetravalent, Hexavalent, Chinese cabbage